

RUGOSIDAD A LARGA DISTANCIA EN UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO DENDRÍTICA

MOISÉS HINOJOSA RIVERA, JORGE ADRIÁN ALDACO CASTAÑEDA*



Actualmente se acepta que las superficies de fractura de los materiales heterogéneos son objetos autoafines. Mandelbrot¹ fue el primero que intentó correlacionar la rugosidad de la superficie de fractura de aceros con sus propiedades mecánicas macroscópicas. Argumentó que existe una correlación directa entre la tenacidad a la fractura del material y el exponente de rugosidad de sus superficies de fractura. Desde entonces, el análisis de autoafinidad de superficies de fractura se ha aplicado a una diversidad de materiales. El uso de métodos estadísticos sofisticados, en conjunto con técnicas para el registro de datos topográficos como microscopía del efecto túnel, microscopía de fuerza atómica y microscopía óptica, permite caracterizar la autoafinidad de las superficies de fractura a través de la determinación de sus exponentes de rugosidad y la longitud de correlación.²

Las abundantes referencias citadas por Bouchaud³ sugieren que las superficies de fractura muestran dos exponentes de rugosidad característicos. Las superficies generadas por grietas que se propagan rápidamente tienden a mostrar el llamado exponente universal $z = 0.8$.⁴ Para propagación lenta, como la obtenida en ensayos de fatiga, se observa un exponente de rugosidad menor, $z=0.5$. En algunos casos pueden detectarse ambos exponentes para la misma superficie de fractura,^{5,6} para las menores longitudes de escala, a nivel nanométrico típicamente, se detecta el exponente $z = 0.5$, con el exponente universal, manifestándose en las escalas de micrómetros-milímetros, ambos exponentes separados a una longitud de quiebre característica. Para condiciones cinéticas rápidas, el exponente de 0.8

se ha podido observar aun en las escalas más pequeñas. En todo caso, el papel de la microestructura y sus relaciones con los parámetros autoafines no se ha comprendido completamente.

Ninguno de los dos exponentes de rugosidad está directamente relacionado a la microestructura. Se ha intentado relacionar la longitud de quiebre con el tamaño de algunos elementos microestructurales en algunos materiales.⁷

Las superficies de fractura son autoafines para longitudes de escala que van hasta un valor característico llamado longitud de correlación, x , para escalas más allá de este límite la superficie puede considerarse un objeto euclidiano. El frente de grieta puede visualizarse como una línea avanzando a través de un medio donde los elementos microestructurales obstaculizan su avance. Se intuye que las interacciones del frente de grieta con las mayores heterogeneidades de la microestructura determinarán la longitud de correlación. Hinojosa⁸ ha reportado la rugosidad a larga distancia de la superficie de fractura de una superaleación de níquel, propone que la longitud de correlación es del orden del tamaño de grano. Los resultados de Reyes⁹ sugieren también que la longitud de correlación corresponde al tamaño de las esferulitas en polímeros parcialmente cristalinos.

En este trabajo reportamos la autoafinidad de la superficie de fractura de impacto de una aleación de aluminio dendrítica. Datos topográficos se registraron con microscopía de fuerza atómica (MFA), microscopía electrónica de barrido (MEB) y rugosimetría, se cubrió un total de siete décadas de longi-

*Doctorado en Ingeniería de Materiales, FIME, UANL.

tud de escala mediante estas técnicas. La microestructura del material es especialmente interesante, pues contiene diversas fases de tamaños variados, las mayores heterogeneidades son los brazos dendríticos primarios y el tamaño de grano, con dimensiones aproximadas del mismo orden. El interés particular de este trabajo se centró en encontrar una relación entre estas longitudes características del material y la longitud de correlación de la superficie de fractura.

Experimentación

El material empleado en el presente trabajo es una aleación de aluminio-silicio tipo A319, refinada y modificada. Esta aleación se utiliza en la industria automotriz para formar piezas mediante vaciado. La composición química es (% peso): Si: 7.147, Cu: 3.261, Fe: 0.612, Zn: 0.664, Mn: 0.374, Ni: 0.041, Ti: 0.154, Mg: 0.313, Sr: 0.014, Al: balance. El refinamiento del grano se logra por adición de titanio y la modificación de la fase eutéctica se obtiene mediante adiciones de estroncio. La microestructura típica es dendrítica con diversas fases presentes.

La figura 1 muestra las diferentes fases identificadas en la complicada microestructura: fase alfa (solución sólida rica en aluminio), silicio, fase eutéctica, Al_2Cu , Al_5FeSi y $\text{Al}_{15}(\text{MnFe})_3\text{Si}_2$. El material presenta además una estructura granular, la cual no se observa en la figura 1. Esta estructura fue analizada en muestras atacadas con reactivo Keller. Las mayores heterogeneidades fueron el tamaño de grano con valor promedio de 446 μm y la longitud de los brazos dendríticos primarios, con valor de 314 μm . Los tamaños de las otras fases fueron mucho más pequeños, inferiores a 40 μm .

Se maquinaron probetas para ensayo tipo Charpy, de acuerdo a la norma ASTM E23, que fueron fracturadas para obtener las superficies a analizar. Se realizaron observaciones fractográficas, utilizando MEB y MFA. La figura 2a muestra una fractura típica vista en MEB. Se observa un modo de fractura mixto intergranular y transgranular con evidencia de ligera deformación plástica. La figura 2b muestra una imagen tridimensional de MFA de la superficie.

Los datos topométricos utilizados para el análisis de autoafinidad se obtuvieron mediante tres técnicas diferentes: MFA, MEB y rugosimetría. En cada caso se obtuvieron perfiles de alturas en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la

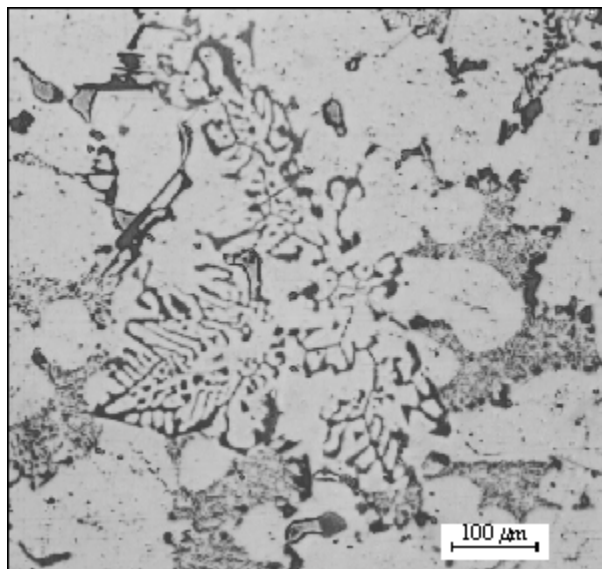
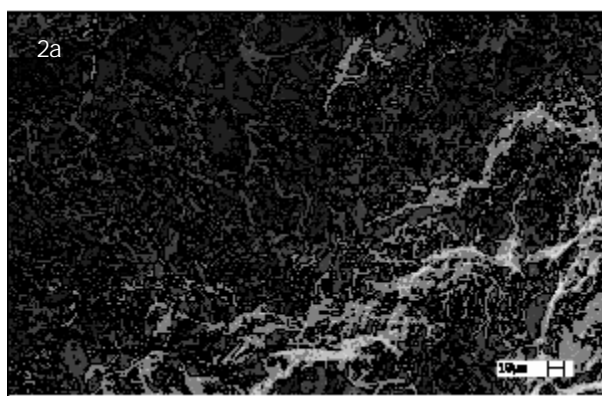


Fig. 1. Microestructura de la aleación Al-Si, muestra pulida sin ataque. Se indican las fases alfa (matriz), Al_2Cu (1), silicio (2), $\text{Al}_{15}(\text{MnFe})_3\text{Si}$ (3) y la fase eutéctica (4).



2b

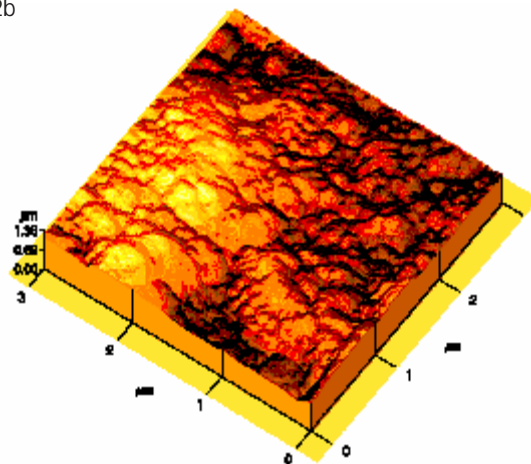


Fig. 2. Superficie de fractura típica observada por MEB (2a) y MFA (2b).

grieta, esto es, una dirección paralela al frente de grieta, considerado razonablemente recto.

Con el fin de cubrir el intervalo de escala en orden de milímetros, se usó un perfilómetro para registrar perfiles de una longitud máxima de aproximadamente un centímetro. La mejor resolución en la altura fue de 0.25 micrones y el tamaño de la punta es de 2 mm. Un perfil típico consta de más de 10,000 puntos. Los perfiles de MEB permitieron cubrir la escala en el nivel micrométrico. Para esta técnica las superficies fueron cubiertas electrolíticamente con níquel, seleccionadas y pulidas en planos perpendiculares a la dirección de propagación. Se obtuvieron imágenes contrastadas mediante electrones retrodispersados a diferentes ampliaciones, desde 100X hasta 2000X. Los perfiles de alturas se extrajeron mediante algoritmos de análisis de imágenes, el excelente contraste entre el aluminio y el depósito de níquel facilitó esta tarea. La mejor resolución obtenida en estos perfiles de 1024 puntos fue de 0.06 micrómetros/punto. La figura 3 muestra un ejemplo de los perfiles obtenidos mediante esta técnica.

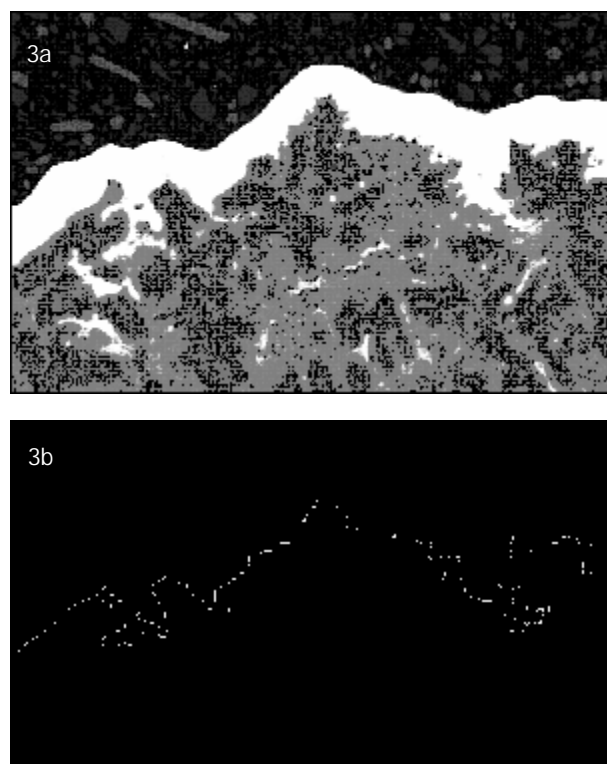


Fig. 3. Imagen típica de un perfil de fractura. Imagen de MEB (3a). El respectivo perfil de fractura se muestra en (3b).

Las observaciones de MFA en modo de contacto permitieron obtener la mayor resolución y cubrir la escala en el nivel de nanómetros. Se obtuvieron barridos desde 0.5 micrómetros hasta 10 micrómetros. Los perfiles de 512 puntos tuvieron una distancia mínima entre puntos de poco más de un nanómetro.

El análisis de autoafinidad se realizó mediante el método de bandas o ventanas de ancho variable. Se calcula la cantidad:

$$Z_{\max}(r) = \left\langle \max\{z(r')\}_{x(r') \leq x+r} - \min\{z(r')\}_{x(r') \leq x+r} \right\rangle_x \propto r^z$$

Donde r es el tamaño de la ventana, $Z_{\max}(r)$ es la diferencia entre la altura máxima y la mínima en la ventana, promediada en todos los posibles orígenes de la ventana. Se promediaron un total de diez perfiles de rugosimetría, diez perfiles de MEB para cada magnificación y diez perfiles para cada tamaño de barrido de MFA.

Resultados y discusión

La figura 4 muestra los resultados del análisis de autoafinidad. Se obtuvo una curva promedio única, juntando las curvas obtenidas para cada técnica. Las curvas de MFA y de MEB se traslapan en la región del orden de 0.1 mm y dan una curva continua, mostrando una compatibilidad total confirmando los resultados previamente reportados por Daguier⁷ e Hinojosa.⁸ Existe una discontinuidad entre los datos de MEB y los del perfilómetro, pero la tendencia es la misma claramente. Este hueco muestra la incapacidad del MEB para cubrir la región de escalas grandes del régimen de autoafinidad, probando a la vez las ventajas del uso de un perfilómetro, que permite cubrir las escalas necesarias para observar el límite del régimen autoafín y la determinación de esta longitud de correlación. Como puede observarse, se detectó el esperado exponente $z = 0.81$ en todo el régimen autoafín, que se extiende sobre más de cinco décadas. La longitud de correlación se estima a un valor de $x = 456$ mm.

La máxima longitud de los perfiles del rugosímetro fue de aproximadamente un centímetro, y las máximas heterogeneidades tienen longitudes características de menos de 500 mm. Esto garantiza que el análisis de autoafinidad permitirá la determinación precisa de la longitud de correlación si ésta es del orden de dichas heterogeneidades. Esto se cumple en nuestro trabajo, como puede verse claramente

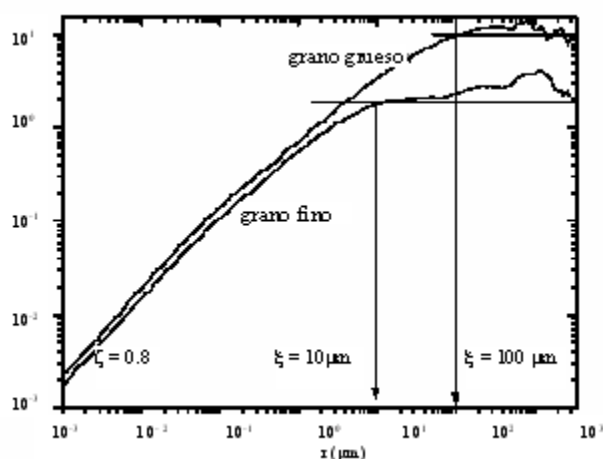


Fig. 4. Curva de autoafinidad sobre más de siete décadas de longitud de escala, aquí se indican la longitud de correlación ξ , y el exponente de rugosidad ζ .

en la figura 4. De este resultado podemos decir con certeza que la longitud de correlación efectivamente corresponde a la longitud característica de las mayores heterogeneidades, que son los granos y las dendritas, con tamaño de 314 y 446 μm , respectivamente. De la microestructura analizada se puede especular que existe competencia entre el tamaño de grano y la longitud de los brazos primarios, el frente de grieta avanza con longitud de pasos característicos que corresponden ya sea al tamaño de grano o al otro parámetro. Para escalas superiores a esta longitud de correlación, el frente de grieta no "ve" nada y la superficie de fractura puede considerarse euclidianamente plana para escalas encima de este valor. Estos resultados concuerdan con los reportados por Hinojosa⁸ en el caso de una aleación de níquel, en la que encontró que la longitud de correlación era del orden del tamaño de grano, figura 5, usando muestras con diferencias en tamaño de grano de un orden de magnitud. Reyes,⁹ al estudiar las superficies de fractura de un polímero semicristalino, reporta resultados que sugieren que la longitud de correlación es del orden del tamaño de las esferulitas en este polímero. Existen muchas dudas acerca de la correlación entre la microestructura y los parámetros de autoafinidad, pero estos resultados deben ayudar a mejorar la comprensión del proceso de fractura.

Conclusiones

El uso conjunto de MFA, MEB y perfilometría permi-

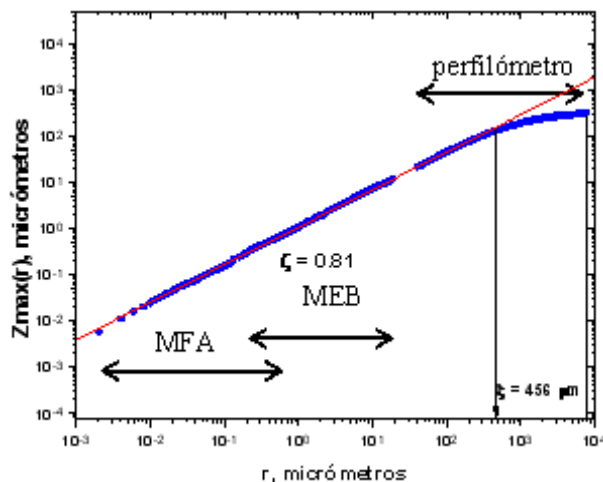


Fig. 5. En aleaciones de níquel la longitud de correlación es del orden del tamaño de grano.⁸

tió realizar el análisis de la autoafinidad de las superficies de fractura en un intervalo de siete décadas de longitud de escala, desde nanómetros hasta un centímetro. Se demuestra que las tres técnicas son totalmente compatibles cuantitativamente. Se logró observar la totalidad del régimen autoafín junto con su límite inferior, esta longitud de correlación es del orden de la longitud característica de las mayores heterogeneidades, que son el tamaño de grano y tamaño de brazos dendríticos primarios en la aleación Al-Si. El exponente de 0.8 se obtuvo para todo el régimen, al corroborar los resultados anteriores obtenidos para condiciones cinéticas de propagación de grieta similares en una amplia diversidad de materiales.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al apoyo del CONACYT y el programa PAICYT de la UANL. Se agradece especialmente la colaboración de E. Velasco (NEMAK), L. Cruz, N. Cárdenas y O. Garza. Virgilio González y C. Guerrero contribuyeron a este trabajo con valiosos comentarios.

Resumen

Se estudia la rugosidad a larga distancia de la superficie de fractura de una aleación dendrítica de aluminio, el análisis se efectúa en un amplio intervalo de escalas de longitud. Se realizó el análisis de autoafinidad a muestras fracturadas en ensayos de

impacto de Charpy. El uso conjunto de microscopía de fuerza atómica (MFA), microscopía electrónica de barrido (MEB) y perfilometría permitió cubrir un espectro de longitudes de escala desde un nanómetro hasta cerca de un centímetro. Se obtuvo el exponente de rugosidad, así como la longitud de correlación, utilizando el método de ventana de ancho variable. Se obtuvo un valor de $z @ 0.8$ para el exponente de rugosidad, correspondiendo el valor reportado como "universal". Se encontró que el valor de la longitud de correlación corresponde a las longitudes características de las mayores heterogeneidades presentes en la microestructura compleja del material. Estos resultados proveen información que ayuda a mejorar nuestra comprensión del papel de los parámetros microestructurales en los mecanismos de propagación de grietas.

Palabras clave: Autoafinidad, Exponente de rugosidad, Longitud de correlación, Superficie de fractura.

Abstract

Long distance roughness of the fracture surface of a dendritic aluminum alloy is studied over a wide range of length scales in this article. Self-affinity analysis was performed on samples broken in Charpy impact tests. Simultaneous use of atomic force microscopy (AFM), scanning electron microscopy (SEM) and stylus profilometry allowed us to cover a wide spectrum of length scales, spanning over seven decades, from a few nanometers up to one centimeter. The roughness exponent and correlation length were obtained using the variable bandwidth method. For the roughness exponent, a value of 0.8 was obtained, corresponding to the reported universal exponent. Correlation length was found to correspond

well to the characteristic length of the largest heterogeneities in the complex microstructure. Our results provide information that can help improve our understanding of the role of microstructural parameters on crack propagation mechanisms.

Keywords: Self-affinity, Roughness exponent, Correlation length, Fracture surface

Referencias

1. B.B. Mandelbrot, D.E. Passoja and A.J. Paullay, "Fractal Character of Fracture Surfaces of Metals", *Nature*, 308, pp 721-722 (1984).
2. J. Schmittbuhl, J.P. Vilotte, S. Roux, "Reliability of self-affine measurements", *Phys. Rev. E*, 51 131 (1995).
3. E. Bouchaud, "Scaling Properties of Cracks", *J. Phys.: Condens. Matter* 9 (1997) 4319-4344.
4. E. Bouchaud, G. Lapasset and J. Planès, *Europhys Lett.*, 13, pp 73 (1990).
5. P. Daguer, B. Nghiem, E. Bouchaud and F. Creuzet, "Pinning and Depinning of Crack from in Heterogeneous Materials", *Phys. Rev Lett.*, 78, pp 1062 (1997).
6. P. Daguer, S. Hénaux, E. Bouchaud, and F. Creuzet, "Quantitative Analysis of a Fracture Surface by Atomic Force Microscopy", *Phys. Rev. E*, 53, 5637 (1996).
7. P. Daguer, Ph. D. Thesis, Université Paris 6 (en francés), noviembre (1997).
8. M. Hinojosa, E. Bouchaud and B. Nghiem. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Volume 539, Research Society, Warrendale Pennsylvania, pp. 203-208, 1999.
9. Edgar Reyes, Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 1999.